

# 把持物体のオンライン位置姿勢情報の欠損にロバストな動的物体操作

九州大学 ○ 河村 晃宏 田原 健二 倉爪 亮 長谷川 勉

## Robust Grasping and Manipulation Method against Lack of Real-time Object Information

Kyushu University ○ Akihiro KAWAMURA, Kenji TAHARA  
Ryo KURAZUME and Tsutomu HASEGAWA

Abstract: This paper proposes a novel object grasping and manipulation method that is robust against the lack of each position and attitude information for the grasped object in real-time. This method ensures to be able to control the position and attitude of the grasped object with maintaining stability, even if the geometrical information of the grasped object becomes unavailable during manipulation for some reasons. Firstly, the dynamical model of grasping an object using a multi-fingered hand-arm system is given. Next, a control scheme to accomplish the robust object grasping and manipulation using virtual object position and attitude is presented. After that, several numerical simulations are performed and the usefulness of proposed method is discussed through these simulation results.

Key Words: Manipulation, Multi-fingered hand-arm system

### 1 はじめに

マニピュレータの手先空間制御手法の一つに、カメラなどを用いた視覚サーボが知られている。本手法は、制御対象の位置情報を直接得られることから、高精度な制御が期待でき、手先の位置決めだけでなく、多指ハンドによる物体把持・操作に対しても有効な手段であるとして、これまで多くの研究が行われている [1]。一方、これら視覚を用いた制御手法では、オクルージョンや視覚範囲の制限などに起因する情報欠損により、安定した制御が困難となる問題が生じる。この問題に対して、情報欠損に頑健な制御手法がこれまで幾つか提案されている [2-4]。小澤, Cheah らは、マニピュレータの手先位置情報の欠損に対しても、安定に振る舞う制御則を構築することで、頑健な位置制御を実現している [2, 3]。しかし、これらは基本的にマニピュレータのリーチングに関する研究であり、物体把持・操作問題へそのまま導入することは困難である。長谷川らは、事前に得ている物体形状の幾何情報を基に、得られた視覚情報から最小化問題を解くことで推定を行い、カメラ画像の量子化誤差に対して頑健な物体操作を実現している [4]。しかし本手法では、フレームアウトやオクルージョンなどによる大部分情報欠損は考慮されておらず、また、物体の位置・姿勢推定、および推定結果を用いた把持計画の両方において、把持物体の詳細な幾何情報が必要となるため、これらが事前知識として与えられることが必須である。

本稿では、物体の事前知識を必要とせず、かつ視覚によるオンライン位置・姿勢情報の欠損に対して頑健な動的物体把持・操作手法を提案する。提案手法では、視覚情報が得られている間は、筆者らがこれまで提案してきた動的物体把持・操作手法 [5] を用いて正確な位置・姿勢制御を行い、何らかの原因によって視覚情報が得られなくなった場合、Tahara ら [6] によって提案されている仮想位置・姿勢を用いた手法を基に、新たに構築する外界センサーレス制御手法に切り替えることで、安定把持を維持しながら大まかな目標位置・姿勢への制御を行う。これにより、視覚情報が得られる間は正確に制御を行い、得られない間においても、安定把持を破綻させることなく、目標とする位置・姿勢を近似的に実現することが可能となる。はじめに、システム全体のダイナミク

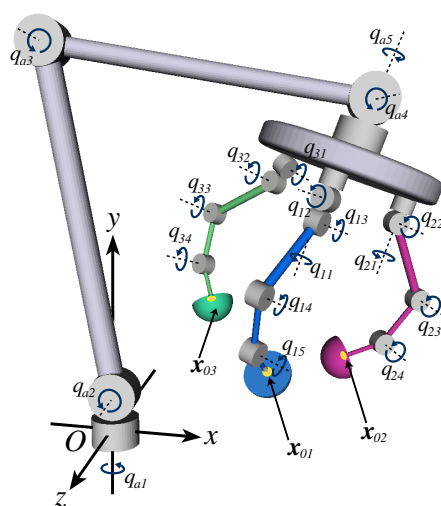


Fig.1 Multi-fingered hand-arm system

スを導出し、その後、制御則を構築する。最後に数値シミュレーションによって、提案手法の有効性を示す。

### 2 多指ハンドアームシステムのモデルとダイナミクス

本論文で扱うハンドアームシステムの一例を図 1 に示す。このモデルは、それぞれ物体の位置姿勢の操作に十分な自由度を持つ多指ハンド部とアーム部によって構成されている。また、把持対象物は、指先と物体との接触面が平面で構成されていること以外は、任意の形状の物体とする。全ての指先は柔軟で半球形状とし、物体表面上で滑ることなく面接触を伴った回転接触を行う。また、重力の影響については考慮しない。図 1 において、 $O$  は慣性座標系の原点を、 $x_{0i} \in \mathbb{R}^3$  は指先半球中心位置を示す。以降、 $i$  は  $i$  番目の指を意味し、全て慣性座標系で表された値とする。また、腕部と  $i$  番目の指はそれぞれ  $N_a$  と  $N_i$  の自由度を持つ。腕部の関節角は  $q_a \in \mathbb{R}^{N_a}$ 、 $i$  番目の指の関節角は  $q_i \in \mathbb{R}^{N_i}$  とし、ハン

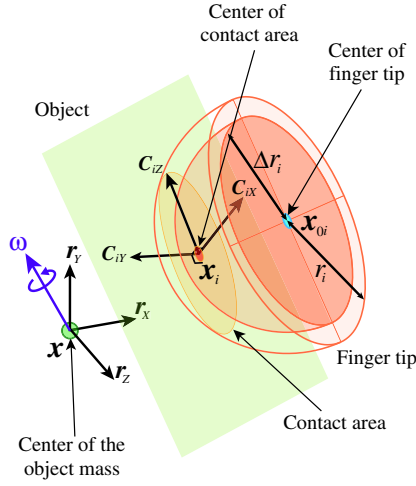


Fig.2 Contact model at the center of the contact area

ドームシステム全体の関節角ベクトルである  $q$  は, ハンド部が  $N$  本の指を持つ時,  $(= (q_a^T, q_1^T, q_2^T, \dots, q_N^T)^T)$  のように表す. 図 2 は把持対象物と指先との関係を示しており,  $O_{c.m.}$  は物体の質量中心を示す.  $x_i \in \mathbb{R}^3$  は接触面中心の位置を示し,  $x = (x, y, z)^T \in \mathbb{R}^3$  は質量中心  $O_{c.m.}$  の位置を示し,  $\omega$  は  $O_{c.m.}$  における物体の姿勢角速度ベクトルを示す. 更に物体姿勢を回転行列  $R = (r_x, r_y, r_z) \in SO(3)$  で表し, 慣性座標系から見た接触面中心における座標系を,  $R \cdot R_{Ci} = (C_{iX}, C_{iY}, C_{iZ})$  で表す. ただし,  $R_{Ci}$  は接触面中心の姿勢を表す回転行列であり,  $C_{iY}$  は接触面に対して垂直な単位ベクトルである.

### 2.1 3次元回転接触拘束

3次元空間における滑りのない回転接触拘束は非ホロノミックな回転拘束条件であり, 全システムの速度に関する各ベクトル  $\dot{q}, \dot{x}, \omega$  について線形となるため, Paffian 拘束として以下の様に表すことができる.

$$\begin{bmatrix} X_{iq} \\ Z_{iq} \end{bmatrix} \dot{q} + \begin{bmatrix} X_{ix} \\ Z_{ix} \end{bmatrix} \dot{x} + \begin{bmatrix} X_{i\omega} \\ Z_{i\omega} \end{bmatrix} \omega = 0, \quad (1)$$

ただし,

$$\begin{cases} X_{iq} = \Delta r_i C_{iZ}^T J_{\Omega i} - C_{iX}^T J_{0i}, & X_{ix} = C_{iX}^T \\ X_{i\omega} = \{C_{iX} \times (x - x_{0i})\}^T - \Delta r_i C_{iZ}^T \\ Z_{iq} = -\Delta r_i C_{iX}^T J_{\Omega i} - C_{iZ}^T J_{0i}, & Z_{ix} = C_{iZ}^T \\ Z_{i\omega} = \{C_{iZ} \times (x - x_{0i})\}^T + \Delta r_i C_{iX}^T, \end{cases} \quad (2)$$

$\omega = (\omega_x, \omega_y, \omega_z)^T \in \mathbb{R}^3$  は物体の瞬時回転軸ベクトルであり,  $r_i$  は指先半球の半径,  $\Delta r_i$  は指先半球中心と接触面との距離を示す (図 2). また,  $J_{\Omega i} \in \mathbb{R}^{3 \times (N_a + \sum_{i=1}^N N_i)}$  は各指の接触面中心における姿勢角速度ベクトルの各関節角  $\dot{q} \in \mathbb{R}^{N_a + \sum_{i=1}^N N_i}$  に関するヤコビ行列,  $J_{0i} \in \mathbb{R}^{3 \times (N_a + \sum_{i=1}^N N_i)}$  は各指の接触面中心の位置  $x_{0i}$  の各関節角  $q \in \mathbb{R}^{N_a + \sum_{i=1}^N N_i}$  に関するヤコビ行列である.

### 2.2 ダイナミクス

式 (1) に示した拘束条件を考慮して, ハンドアームシステムと対象物についてのラグランジュの運動方程式は以下のように表される.

For the multi-fingered hand-arm system:

$$H(q) \ddot{q} + \left\{ \frac{1}{2} \dot{H}(q) + S(q, \dot{q}) \right\} \dot{q} + \sum_{i=1}^N \frac{\partial T_i}{\partial \dot{q}} + \sum_{i=1}^N \left( J_{0i}^T C_{iY} f_i + X_{iq}^T \lambda_{iX} + Z_{iq}^T \lambda_{iZ} \right) = u, \quad (3)$$

For the object:

$$M \ddot{x} + \sum_{i=1}^N \left( -f_i C_{iY} + X_{ix}^T \lambda_{iX} + Z_{ix}^T \lambda_{iZ} \right) = 0 \quad (4)$$

$$I \dot{\omega} + \omega \times I \omega - \sum_{i=1}^N \{C_{iY} \times (x - x_{0i})\} f_i + \sum_{i=1}^N \frac{\partial T_i}{\partial \omega^T} + \sum_{i=1}^N \left( X_{i\omega}^T \lambda_{iX} + Z_{i\omega}^T \lambda_{iZ} \right) = 0, \quad (5)$$

ただし,  $H \in \mathbb{R}^{(N_a + \sum_{i=1}^N N_i) \times (N_a + \sum_{i=1}^N N_i)}$  はハンドおよびアームの慣性行列,  $M = \text{diag}(m, m, m)$  は把持物体の質量,  $I$  は把持物体の慣性テンソル,  $S(q, \dot{q})$  はコリオリ力, 遠心力などを含む歪対称行列,  $u$  は入力トルクベクトル,  $\lambda_{iX}$  と  $\lambda_{iZ}$  はラグランジュ乗数である. また,  $f_i$  は指先接触面中心位置における最大変位量  $r_i - \Delta r_i$  によって発生する反力であり,  $T_i$  は指先の面接触による捻り方向の粘性摩擦を示すエネルギー消散関数である. これらのラグランジュ乗数を含む項によって, ロボットと把持物体間で回転接触拘束を満足する動作を実現することが出来る.

### 3 仮想フレーム

本手法では把持物体の位置姿勢情報の欠損時に仮想フレームを用いて把持物体の操作を行う. 本章では, 仮想フレームの位置姿勢を定義する. まず, 仮想フレームの位置  $x_c$  をロボットの各指先位置より以下のように定める (図 3 参照).

$$x_c = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{0i} \quad (6)$$

更にこの位置における仮想フレームの姿勢をロボットの各指先姿勢から決定される以下のような回転行列  $R_{\text{vir}}$  で表す (図 3 参照).

$$R_{\text{vir}} = (r_{x_{\text{vir}}}, r_{y_{\text{vir}}}, r_{z_{\text{vir}}}) \quad (7)$$

$$r_{x_{\text{vir}}} = \frac{\tilde{r}_{x_{\text{vir}}}}{\|\tilde{r}_{x_{\text{vir}}}\|} \quad \tilde{r}_{x_{\text{vir}}} = \sum_{i=1}^N r_{x_{fi}} \quad (8)$$

$$r_{y_{\text{vir}}} = \frac{\tilde{r}_{x_{\text{vir}}} \times \tilde{r}_{y_{\text{vir}}}}{\|\tilde{r}_{x_{\text{vir}}} \times \tilde{r}_{y_{\text{vir}}}\|} \quad \tilde{r}_{y_{\text{vir}}} = \sum_{i=1}^N r_{y_{fi}} \quad (9)$$

$$r_{z_{\text{vir}}} = r_{x_{\text{vir}}} \times r_{y_{\text{vir}}} \quad (10)$$

ただし,  $r_{x_{fi}}, r_{y_{fi}}$  は指  $i$  の指先姿勢を表す回転行列  $R_{fi}$  の  $x$  軸と  $y$  軸を示すベクトルである.

### 4 制御入力

本章ではまず外界センサにより計測されたオンライン物体位置姿勢情報を用いた把持物体の位置姿勢制御手法を示し, その後, 物体位置姿勢情報の欠損時の仮想フレームを用いた手法を示す.

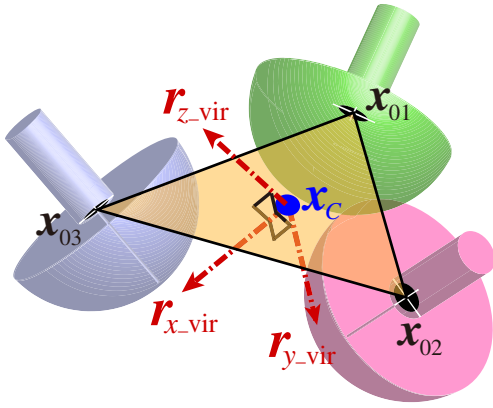


Fig.3 Virtual frame

#### 4.1 オンライン物体位置姿勢情報取得時

安定把持の制御入力を  $u_s$  , 把持物体の位置制御の制御入力を  $u_p$  , 姿勢制御の制御入力を  $u_o$  とし, 入力トルクベクトル  $u$  を以下のように与える .

$$u = u_s + u_p + u_o \quad (11)$$

安定把持の制御入力  $u_s$  を以下に示す .

$$u_s = \frac{f_d}{\sum_{i=1}^N r_i} \sum_{j=1}^N J_{0j}^T (x_c - x_{0j}) - C\dot{q} \quad (12)$$

$$x_c = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{0i}, \quad (13)$$

ただし,  $C \in \mathbb{R}^{(N_a + \sum_{i=1}^N N_i) \times (N_a + \sum_{i=1}^N N_i)} > 0$  は関節粘性係数を表す正定対角行列,  $f_d$  は目標把持力である . この制御入力はそれぞれの指先が全ての指先位置の重心  $x_c$  に向かうような制御を行う . 次に把持物体の位置制御の制御入力  $u_p$  を以下に示す .

$$u_p = K_p \sum_{j=1}^N J_{0j}^T (x_d - x). \quad (14)$$

ただし,  $K_p$  は正のスカラー量であり, 物体の目標位置は  $x_d$  である . 更に物体の姿勢制御の制御入力  $u_o$  を以下に示す .

$$u_o = K_o \sum_{i=1}^N J_{\Omega i}^T \{ (r_x \times r_{xd}) + (r_y \times r_{yd}) + (r_z \times r_{zd}) \} \quad (15)$$

ただし,  $K_o$  は正のスカラー量であり, 物体の目標姿勢は  $R_d = (r_{xd}, r_{yd}, r_{zd})$  である . このとき,  $r_x \times r_{xd}$  は  $r_x$  が  $r_{xd}$  に向かうような回転モーメントを発生させる瞬間回転軸ベクトルであり,  $y$  成分と  $z$  成分についても同様である .

#### 4.2 物体位置姿勢情報の欠損時

物体位置姿勢情報の欠損時には把持物体の位置姿勢制御のための制御入力  $u_p$  と  $u_o$  に正確な物体の位置姿勢をフィードバックすることが出来なくなり, 物体把持が破綻する . 本手法では, 物体位置姿勢情報欠損時に対するロバスト性を考え, 実際の物体の位置姿勢を用いるのではなく, 各指先位置および姿勢から決定される仮想フレームを物体の代わりに操作する . このとき, オンライン物体位置姿勢情報取得時と同じ物体把持のための制御入力  $u_s$  に加えて仮想フレームの位置・姿勢制御のための制御入力  $u_{p_{vir}}$  および

$u_{o_{vir}}$  を用いる . つまり, 入力トルクベクトル  $u$  を以下のように変更する .

$$u = u_s + u_{p_{vir}} + u_{o_{vir}} \quad (16)$$

仮想フレームの位置制御のための制御入力  $u_{p_{vir}}$  を示す . 式 (14) 中の物体位置  $x$  を仮想物体位置  $x_c$  に置き換え, 位置制御のための制御入力を以下のように定める .

$$u_{p_{vir}} = K_p \sum_{j=1}^N J_{0j}^T (x_{d_{vir}} - x_c). \quad (17)$$

ただし,  $x_{d_{vir}}$  は仮想位置のための目標位置であり, 以下のように設定する .

$$x_{d_{vir}} = x_c + (x_d - x) \quad (18)$$

この仮想目標位置  $x_{d_{vir}}$  は式 (14) と式 (17) の制御入力の切り替え時の各パラメータの値を用いて決定し, 情報欠損が起きている間はその値を保持し続けるものとする . 同様に, 仮想フレームの姿勢制御のための制御入力  $u_{o_{vir}}$  は以下ようになる .

$$u_{o_{vir}} = K_o \sum_{i=1}^N J_{\Omega i}^T \{ (r_{x_{vir}} \times r_{xd_{vir}}) + (r_{y_{vir}} \times r_{yd_{vir}}) + (r_{z_{vir}} \times r_{zd_{vir}}) \} \quad (19)$$

ただし,  $R_{d_{vir}} = (r_{xd_{vir}}, r_{yd_{vir}}, r_{zd_{vir}})$  は仮想姿勢の目標姿勢であり, 以下のように設定する .

$$R_{d_{vir}} = R_{vir} R^T R_d \quad (20)$$

目標位置姿勢と実際の物体の位置姿勢との誤差を引き継いだ仮想目標位置姿勢を設定することによって, 制御対象を仮想フレームに切り替えた際の過大なトルクが出力されることを防いでいる .

## 5 数値シミュレーション

図 1 に示す 5 自由度の指 1 本と 4 自由度の指 2 本を持つハンドと 5 自由度のアームを持つハンドアームシステムを用いた三角柱の把持と姿勢制御の数値シミュレーションを行った . ハンドアームシステムおよび三角柱のパラメータを表 1 に示す . ただし,  $Y_i$  は物体の質量中心  $O_{c.m.}$  から  $i$  番目の指先が接触している物体表面までの距離,  $\theta_{i_i}$  は底面と平行な断面における外角である . 表 2 には目標把持力および各ゲイン, 把持物体の目標位置・姿勢を示す . 更にシステムの初期状態を表 3 に示す . このときの物体の位置・姿勢の時系列データを図 4 に示す . 図 4 中の Available は視覚情報が利用可能な時間帯を示し, Unavailable は視覚情報欠損が起きている時間帯を示す . Control Target はその時間帯に実際の物体位置姿勢と仮想フレームの位置姿勢のどちらを操作対象としているかを示しており, 更に操作対象を実線で示している . また, 位置に関しては慣性座標系における  $x$  軸方向の位置を, 姿勢に関しては姿勢を表す 3 軸のうち  $x$  軸に関する値をプロットしている . この図から, 視覚情報欠損時においても物体把持が破たんすることなく操作し続けられていること, 情報が得られる場合には目標位置・姿勢に到達していることがわかる .

## 6 おわりに

把持物体のオンライン位置姿勢情報の欠損にロバストな動的物体操作手法を提案した . まず, ロボットおよび把持物体のダイナミクスを示した . 次に仮想フレームを定義し, 把持物体の位置姿勢情報取得時と欠損時の両方の場合の物

Table 1 Physical parameters

| Triple-fingered hand-arm system  |   |           |           |           |
|----------------------------------|---|-----------|-----------|-----------|
| 1 <sup>st</sup> link length      | $l_{a1}$  | 1.300[m]  | $l_{i1}$  | 0.300[m]  |
| 2 <sup>nd</sup> link length      | $l_{a2}$  | 1.000[m]  | $l_{i2}$  | 0.200[m]  |
| 3 <sup>rd</sup> link length      | $l_{a3}$  | 0.175[m]  | $l_{i3}$  | 0.140[m]  |
| 1 <sup>st</sup> mass center      | $l_{ga1}$   | 0.650[m]  | $l_{gi1}$ | 0.150[m]  |
| 2 <sup>nd</sup> mass center      | $l_{ga2}$   | 0.500[m]  | $l_{gi2}$ | 0.100[m]  |
| 3 <sup>rd</sup> mass center      | $l_{ga3}$   | 0.0875[m] | $l_{gi3}$ | 0.070[m]  |
| 1 <sup>st</sup> mass             | $m_{a1}$  | 1.300[kg] | $m_{i1}$  | 0.250[kg] |
| 2 <sup>nd</sup> mass             | $m_{a2}$  | 1.000[kg] | $m_{i2}$  | 0.150[kg] |
| 3 <sup>rd</sup> mass             | $m_{a3}$  | 0.400[kg] | $m_{i3}$  | 0.100[kg] |
| 1 <sup>st</sup> Inertia $I_{a1}$ | diag(7.453, 7.453, 0.260) $\times 10^{-1}$ [kg·m <sup>2</sup> ] |           |           |           |
| 2 <sup>nd</sup> Inertia $I_{a2}$ | diag(3.397, 3.397, 0.128) $\times 10^{-1}$ [kg·m <sup>2</sup> ] |           |           |           |
| 3 <sup>rd</sup> Inertia $I_{a3}$ | diag(0.291, 0.291, 0.500) $\times 10^{-1}$ [kg·m <sup>2</sup> ] |           |           |           |
| 1 <sup>st</sup> Inertia $I_{i1}$ | diag(7.725, 7.725, 0.450) $\times 10^{-3}$ [kg·m <sup>2</sup> ] |           |           |           |
| 2 <sup>nd</sup> Inertia $I_{i2}$ | diag(2.060, 2.060, 0.120) $\times 10^{-3}$ [kg·m <sup>2</sup> ] |           |           |           |
| 3 <sup>rd</sup> Inertia $I_{i3}$ | diag(0.538, 0.538, 0.031) $\times 10^{-3}$ [kg·m <sup>2</sup> ] |           |           |           |
| Radius of fingertip $r_i$        | 0.070[m]  |           |           |           |
| Stiffness coefficient $k_i$      | 1.000 $\times 10^5$ [N/m <sup>2</sup> ]                         |           |           |           |
| Damping function $\xi_i$         | 1.000 $\times (r_i^2 - \Delta r_i^2) \pi$ [Ns/m <sup>2</sup> ]  |           |           |           |

Object

|               |   |
|---------------|---|
| Mass $m$      | 0.037[kg]   |
| $Y_1$         | 0.092[m]  |
| $Y_2$         | 0.048[m]  |
| $Y_3$         | 0.048[m]  |
| $\theta_{t1}$ | 1.833[rad]  |
| $\theta_{t2}$ | 1.833[rad]  |
| $\theta_{t3}$ | 2.618[rad]  |
| Inertia $I$   | diag(1.273, 0.193, 1.148) $\times 10^{-3}$ [kg·m <sup>2</sup> ] |

Table 2 Desired grasping force and gains

|       |   |
|-------|---|
| $f_d$ | 10.0[N]   |
| $K_p$ | 4.762   |
| $K_o$ | 0.238   |
| $C_a$ | diag(1.003, 0.651, 0.735, 0.278, 0.177) $\times 10^{-1}$ [Ns·m/rad]                               |
| $C_1$ | diag(0.606, 0.687, 0.786, 0.642, 0.198) $\times 10^{-2}$ [Ns·m/rad]                               |
| $C_2$ | diag(0.468, 0.780, 0.318, 0.099) $\times 10^{-2}$ [Ns·m/rad]                                      |
| $C_3$ | diag(0.648, 0.780, 0.318, 0.099) $\times 10^{-2}$ [Ns·m/rad]                                      |
| $x_d$ | (0.100, 0.500, 0.700) <sup>T</sup> [m]  |
| $R_d$ | $\begin{bmatrix} 0.88 & -0.32 & -0.34 \\ 0.34 & 0.94 & 0.00 \\ 0.32 & -0.12 & 0.94 \end{bmatrix}$ |

Table 3 Initial condition

|           |   |      |      |
|-----------|---|------|------|
| $\dot{q}$ | $\mathbf{0}$ [rad/s]                                      |      |      |
| $q_a$     | (-0.183, -1.369, 1.898, 1.343, -0.787) <sup>T</sup> [rad] |      |      |
| $q_{01}$  | (1.007, 0.235, -0.771, 1.338, 0.328) <sup>T</sup> [rad]   |      |      |
| $q_{02}$  | (0.242, -0.733, 1.122, 0.754) <sup>T</sup> [rad]          |      |      |
| $q_{03}$  | (2.019, -0.924, 0.912, 1.088) <sup>T</sup> [rad]          |      |      |
| $\dot{x}$ | $\mathbf{0}$ [m/s]  |      |      |
| $x$       | (0.158, 0.501, 0.681) <sup>T</sup> [m]                    |      |      |
| $\omega$  | $\mathbf{0}$ [rad/s]                                      |      |      |
| $R$       | 1.00  | 0.00 | 0.00 |
|           | 0.00  | 1.00 | 0.00 |
|           | 0.00  | 0.00 | 1.00 |

体把持および位置姿勢操作のための制御入力を示した。最後に提案する制御入力によって、物体情報欠損時においてもロボストに把持物体の位置姿勢制御が実現できることを数値シミュレーションによって示した。実環境下で視覚センサや姿勢センサなどを用いた場合の有効性については、今後実験により検証する予定である。

## 謝辞

本研究の遂行にあたり、日本学術振興会科学研究費補助金特別研究員奨励費の助成を受けました。ここに深く感謝致します。

## 文献

- [1] S. Hutchinson, G. D. Hager and P. I. Corke, "A tutorial on visual servo control," *IEEE Trans. on Robot. and Automation*, vol. 12, no. 5, pp. 651–270, 1996.

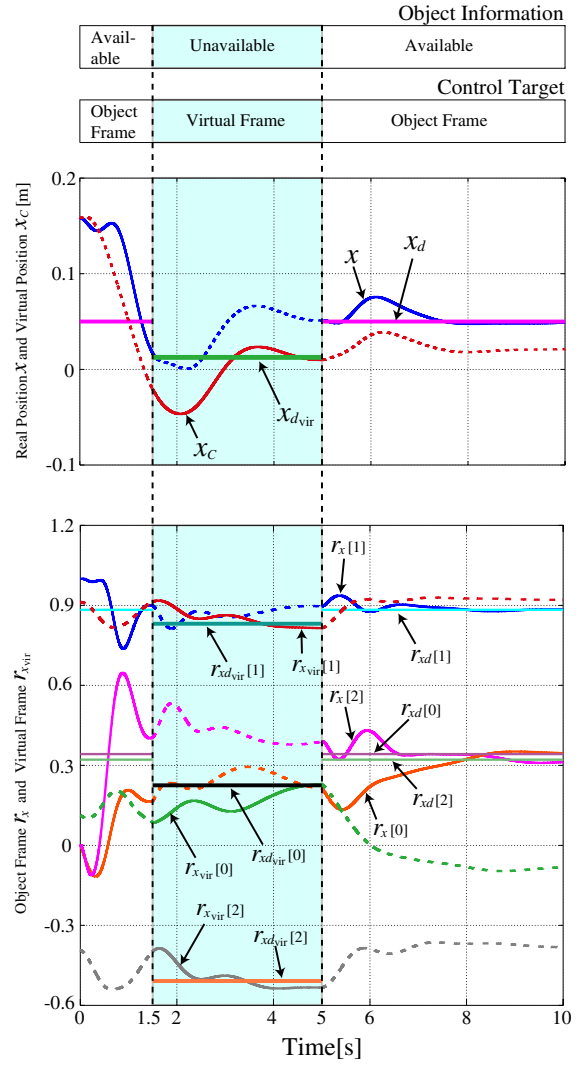


Fig.4 Transient responses of position and attitude of real object and virtual frame

- [2] 小澤隆太, 大林勇次郎: “視覚情報を陰的に利用した作業座標系での適応型 PD 制御”, 第 27 回日本ロボット学会学術講演会, 2009.
- [3] C. C. Cheah and J. J. E. Slotine, “Task-space Setpoint Control of Robots with Dual Task-space Information,” *Proc. of the 2009 IEEE Int. Conf. Robot. Automat.*, pp. 3706–3711, Kobe, Japan, 2009.
- [4] 長谷川, 本田, 松岡, 桐木: 多関節多指ハンドのための操作対象の位置と姿勢のセンシング-視覚情報と接触情報の融合-, 電気学会論文誌 C(電子・情報・システム部門誌), vol. 118, no. 9, pp. 1340–1346. 1998.
- [5] A. Kawamura, K. Tahara, R. Kurazume and T. Hasegawa, “Dynamic Grasping for an Arbitrary Polyhedral Object by a Multi-fingered Hand-Arm System,” *2009 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 2264–2270, St. Louis, Missouri, 2009.
- [6] K. Tahara, S. Arimoto and M. Yoshida, “Dynamic object manipulation using a virtual frame by a triple soft-fingered robotic hand,” *Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Automat.*, pp. 4322–4327, Anchorage, AK, May 2010.